

(19)



JAPANESE PATENT OFFICE

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number: **08334803 A**

(43) Date of publication of application: **17 . 12 . 96**

(51) Int. Cl.  
**G02F 1/37**  
**H01S 3/07**  
**H01S 3/108**  
**H01S 3/16**  
**H01S 3/18**

(21) Application number: **07140805**

(71) Applicant: **NIKON CORP**

(22) Date of filing: **07 . 06 . 95**

(72) Inventor: **YAMATO SOICHI**

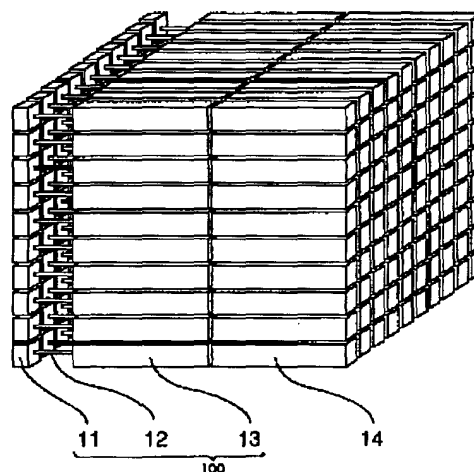
**(54) UV LASER BEAM SOURCE**

**(57) Abstract:**

**PURPOSE:** To provide a UV laser beam source which is capable of generating UV rays having sufficient outputs and low coherence as the light source of an exposure machine stably for a long time, is small in size and facilitates maintenance.

**CONSTITUTION:** This UV laser beam source is composed of 10 pieces  $\times$  10 pieces, total 100 pieces of laser elements. The respective laser elements have laser beam generating sections 100 which generate long-wavelength light of visible light or IR light and wavelength conversion sections 14 which convert the generated laser beams to UV rays. These laser beam generating sections 100 have semiconductor lasers 11, optical fibers 12 and solid-state lasers 13. These wavelength conversion sections 14 are constituted to include nonlinear crystals which convert the wavelengths of incident light rays and outputs these rays.

COPYRIGHT: (C)1996,JPO



(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平8-334803

(43)公開日 平成8年(1996)12月17日

(51)Int.Cl. <sup>6</sup>	識別記号	序内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 2 F	1/37		G 0 2 F	1/37
H 0 1 S	3/07		H 0 1 S	3/07
	3/108			3/108
	3/16			3/16
	3/18			3/18
審査請求 未請求 請求項の数9 O L (全 11 頁)				

(21)出願番号 特願平7-140805

(22)出願日 平成7年(1995)6月7日

(71)出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72)発明者 大和 壮一

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株

式会社ニコン内

(74)代理人 弁理士 三品 岩男 (外1名)

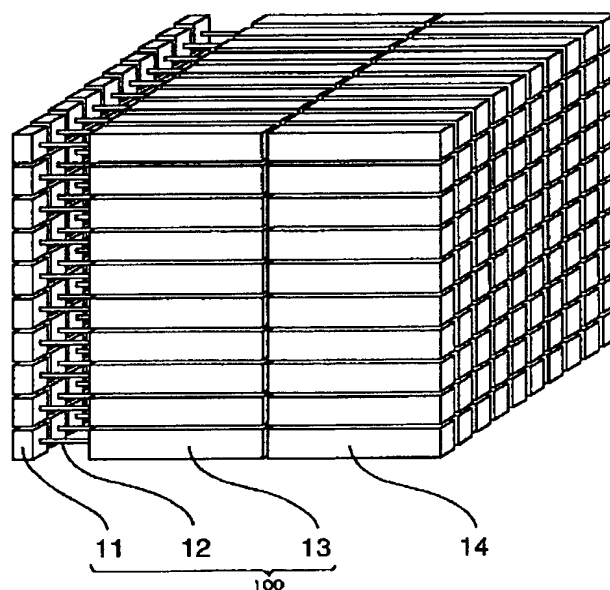
(54)【発明の名称】 紫外レーザー光源

(57)【要約】

【目的】露光機の光源として十分な出力と低コヒーレンスとを備えた紫外光を、長時間安定して発生することができ、かつ、小型でメンテナンスが容易な紫外レーザー光源を提供する。

【構成】10本×10本で計100本のレーザー要素から構成されており、各レーザー要素は、可視光あるいは赤外光の長波長光を発生するレーザー光発生部100と、発生したレーザー光を紫外光へ変換する波長変換部14とを有し、レーザー光発生部100は、半導体レーザー11、光ファイバー12、及び、固体レーザー13を有し、波長変換部14は、入射光の波長を変換して出力する非線形結晶を含んで構成される。

図 1



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】赤外から可視までの波長範囲内の光を発生するレーザー光発生部と、前記発生した光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換光学系とを有するレーザー要素を複数並列に束ねて構成したことを特徴とする紫外レーザー光源。

【請求項 2】請求項 1 において、前記レーザー光発生部は、半導体レーザーを有することを特徴とする紫外レーザー光源。

【請求項 3】請求項 2 において、前記レーザー光発生部は、前記半導体レーザーにより発生された光により励起される固体レーザーをさらに有することを特徴とする紫外レーザー光源。

【請求項 4】請求項 1 において、前記レーザー要素は、半導体レーザーと、前記半導体レーザーにより発生された光により励起されるレーザー媒質、及び、前記レーザー媒質で励起された基本波を 5 倍波とする、並列配置された複数の非線形光学結晶を有するレーザー共振器とを有することを特徴とする紫外レーザー光源。

【請求項 5】請求項 1～3 のいずれかにおいて、前記波長変換光学系は、直列配置された 1 つまたは複数の非線形結晶のモノリシック共振器を有することを特徴とする紫外レーザー光源。

【請求項 6】請求項 1 において、前記レーザー要素は、半導体レーザーと、前記半導体レーザーにより発生された光により励起されるレーザー媒質、及び、前記レーザー媒質で励起された光を波長変換する非線形光学結晶を有するレーザー共振器と、前記レーザー共振器で波長変換された光を、さらに波長変換することで紫外光を発生させる、非線形光学結晶を備えた共振器とを有することを特徴とする紫外レーザー光源。

【請求項 7】請求項 1 において、前記レーザー光発生部は、パルス光を発生するパルスレーザーであることを特徴とする紫外レーザー光源。

【請求項 8】請求項 4 または 6 において、前記各レーザー要素のうち前記半導体レーザーを除く部分を、複数並列に束ねて、紫外光の出射端面を形成するものであり、前記レーザー要素のそれぞれは、前記半導体レーザーで発生した光を前記レーザー共振器へ導入する光ファイバーをさらに有することを特徴とする紫外レーザー光源。

【請求項 9】請求項 1 において、前記複数のレーザー要素は、各レーザー要素の紫外光の出射端面がマトリクスを形成するように並列配置されることを特徴とする紫外レーザー光源。

## 【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、半導体製造工程で使用される露光機の光源に係り、特に、紫外レーザー光を発生することができる紫外レーザー光源に関する。

【0002】

【従来の技術】情報機器の進歩にともない、半導体集積回路の機能および記憶容量の向上が求められており、そのためには集積度を上げる必要がある。集積度をあげるためには、個々の回路パターンを小さくすればよいが、最小パターン寸法は、製造過程で使用される露光機の性能で決まる。

【0003】露光機は、マスク上に作られた回路パターンを、光学的に半導体ウェハに投影、転写する。その際のウェハ上での最小パターン寸法  $R$  は、露光機で投影に用いられる光の波長  $\lambda$ 、投影レンズの開口径数  $NA$  によって、以下の式で与えられる。

【0004】 $R = K \cdot \lambda / NA$

ここで、 $K$  は、照明光学系やプロセスによって決まる定数であり、通常 0.5 から 0.8 程度の値をとる。

【0005】解像度を向上させる、すなわち最小パターン寸法  $R$  を小さくする努力は、この定数  $K$  を小さくしようとする方向と、開口径数  $NA$  を大きくする方向、そして、露光光の波長  $\lambda$  を小さくする方向に向かってなされている。

【0006】定数  $K$  を小さくする方法は、まとめて広い意味での超解像と呼ばれている。今までに、照明光学系の改良、変形照明、フェーズシフトマスク法などが提案、研究されてきた。しかし、適用できるパターンに条件があるなどの難点があった。一方、開口径数  $NA$  は、大きいほど最小パターン寸法  $R$  を小さくできるが、同時に焦点深度が小さくなってしまいうので、大きくするのにも限界がある。通常 0.5 から 0.6 程度が適当とされている。

【0007】したがって、最小パターン寸法  $R$  を小さくするのに最も単純かつ有効なのは、露光に用いる光の波長  $\lambda$  を小さくすることであり、短波長の光を発生する、露光機の光源を提供することである。本発明は、この要求に対応してなされたものである。

【0008】ここで、露光機の光源を作るうえでは、短波長化を実現する以外にも、備えるべき条件がいくつかある。以下、これらの条件について説明する。

【0009】第 1 に、数ワットの光出力が求められる。これは、集積回路パターンの露光・転写に要する時間を短く保つために必要である。

【0010】第 2 に、波長 300 nm 以下の紫外光の場合、露光機のレンズとして使える材料が限られ、色収差の補正が難しくなることから、発光スペクトルの線幅を 1 pm 以下にすることが求められる。

【0011】第 3 に、この狭い線幅にともない時間的コヒーレンス（干渉性）が上がるため、狭い線幅の光をそのまま照射すると、スペックルと呼ばれる不要な干渉パ

ターンが生ずる。したがって、これを消すために、光源ではその空間的コヒーレンスを低下させる必要がある。

【0012】次に、従来使用されてきた代表的な露光機用光源について説明すると共に、各光源が、以上のような条件を満たし、かつ、紫外光を発生しようとする場合の問題点について説明する。

#### 【0013】(1) 水銀ランプ

水銀ランプの発光輝線のうち、g線(波長436nm)およびi線(波長365nm)が用いられてきた。このとき得られる最小パターン寸法(以下では最小寸法と呼ぶ)はそれぞれ、約500nmおよび約350nmである。これらの光源のスペクトル線幅は、後述するレーザーより広く、したがって、時間的なコヒーレンスが低かった。線幅が広くても、これらの波長ではレンズの色収差の補正が可能であったので、従来は問題はなかった。また、水銀ランプの空間的コヒーレンスもレーザーに比べれば低く、これらのふたつのコヒーレンスの低さから、スペックルの発生は問題とならなかった。

【0014】しかし、上記水銀輝線は波長が長く、新しく要求される最小寸法に対応することが困難になってきた。水銀輝線の、より短波長の紫外輝線を使う方法も一部で用いられたが、そのスペクトル線幅が広く、紫外領域では色消しレンズの利用ができないため、紫外領域での使用が困難であるとされている。

#### 【0015】(2) KrFエキシマレーザー

KrFエキシマレーザーは、248nmの光を発する。したがって、最小寸法も250nm付近になる。この波長では、色消しレンズの製作が困難であるので、光源レーザーのスペクトル線幅を、1pm以下に狭帯域化する必要がある。

【0016】ところが、この狭帯域化にともなって、時間的コヒーレンスが上がり、スペックルの発生が問題となる。このため、例えば「エキシマレーザーステップ」(牛田一雄、光学、23巻10号、p602、1994年10月)に記載の例では、空間的コヒーレンスを低下させるための光学系を加えて、スペックルの発生を抑えている。

【0017】露光機用のKrFエキシマレーザーは、すでに開発され使用されているが、エキシマレーザーは水銀ランプに比べて、高価で大型であり、有毒のフッ素ガスを用いる。さらに、光学系やフッ素ガスの交換などのメンテナンスが必要で、その費用が高額になるという問題があった。

【0018】また、発生する光がパルス光であるので、連続光に比べてピークパワーが大きくなり、レーザーおよび露光機内部の光学部品が光損傷を受けやすいという問題があった。

#### 【0019】(3) ArFエキシマレーザー

ArFエキシマレーザーは、193nmの光を発する。このときの実用的な最小寸法は、190nm程度であ

る。現在、露光機用のものは開発中であるが、このレーザーには、KrFエキシマレーザーと同じ短所がある。すなわち、高価で大型で、有毒のフッ素ガスを用い、さらに、光学系やフッ素ガスの交換などのメンテナンスが必要で、その費用が高額になる等である。

【0020】さらに加えて、露光機の色収差低減のために、レーザーの発振線幅を1pm以下に狭帯域化することが、KrFエキシマレーザーに比べて困難であるという短所がある。

10 【0021】また、KrFレーザーに比べてもさらにエネルギーの高い短波長のパルス光であることによって、レーザーや露光機の光学部品の損傷がKrFレーザーに比べてさらにひどくなるという欠点がある。

#### 【0022】(4) 半導体レーザー励起固体レーザーの高調波発生による光源

紫外光を発生する方法として、2次の非線形光学効果を利用して、長波長の光(可視光、赤外光)を紫外光に変換する方法がある。例えば「Longitudinally diode-pumped continuous-wave 3.5-W green laser (L. Y. Liu, M. Oka, W. Wiechman and S. Kubota, Optics Letters, Vol. 19 (1994), p. 189)」に記載されている例のように、半導体レーザー励起の固体レーザーからの光を、波長変換するレーザー光源が開発されてきている。この従来例では、Nd:YAGレーザーの発する1064nmの光を変換して、非線形結晶を用いて波長変換し、4倍高調波である266nmを発生させる方式が開示されている。

30 【0023】このような従来の半導体レーザー励起固体レーザー光源は、コンパクトであること、エキシマレーザーよりもメンテナンスが容易であること、電力効率が高いこと、光出力の制御が容易であることなどを長所として持つ。さらに、パルス光発生以外にも、連続光発生も可能である点も利点である。さらに、発振線幅を小さくする際にも、波長変換する前の長波長の段階で行うことができ、直接に紫外光を制御する必要のあるエキシマレーザーに比べて、その制御が容易である、という長所がある。

40 【0024】このような長所があるにもかかわらず、上記従来技術は、未だ露光機には応用されておらず、レーザー開発が実験室レベルで行われている。露光機的光源としていまだ利用されていない一つの理由は、出力パワーを上げようとすると、非線形結晶の損傷が起きて、装置の寿命が短くなるという欠点があったためである。

【0025】さらに、後述するような理由により、エキシマレーザーのときよりもさらに、空間的コヒーレンスが高くなってスペックルが発生するという欠点もある。

50 【0026】次に、スペックルの発生とコヒーレンスとの関係について、より詳細に説明する。

【0027】スペckルなどの不要な干渉パターンの除去は、光の時間的コヒーレンスを低下させること、あるいは空間的コヒーレンスを低下させることで成し遂げられる。時間的コヒーレンスを低くするという事は、いろいろな周波数の光を混ぜることを意味している。一方、空間的コヒーレンスを低下させるということは、発生場所と伝搬方向の異なる光を混ぜることを意味している。

【0028】ところが、露光機で使用される紫外光は、発振線幅を1  $\mu\text{m}$ 以下にすることが求められており、これは、結果として時間的コヒーレンスを高めてしまう。また、レーザーの発生する光は、有限個の横モードからなっており、この横モードの数が少ないことは空間的コヒーレンスの高いことを意味する。

【0029】従来、KrFエキシマレーザーを用いる露光機では、振動する反射鏡を用いてビームを複数に分割し、空間的コヒーレンスを低下させてきた。エキシマレーザーはもともと数100の横モードで発振し、空間的コヒーレンスはレーザーとしては低めであったので、上記方法で問題はなかった。

【0030】ところが、固体レーザーを非線形結晶で波長変換する場合には、非線形結晶中でビームを強くしぼる必要から、通常、ひとつの横モードで発振させることとなる。これは、空間的コヒーレンスを最高に高い状態にしてしまう事を意味し、このような場合に空間的コヒーレンスの低下させるのは、従来は困難であった。

【0031】

【発明が解決しようとする課題】本発明は、上記従来技術の各問題点、例えば露光機の紫外光源として、エキシマレーザーを用いた場合に生ずる問題であるところの、装置の大型化、有毒のフッ素ガスの使用、メンテナンスの困難さと高価さという諸問題や、露光機の紫外光源として半導体レーザー励起の固体レーザーを用いた場合に予想される、波長変換用の非線形光学結晶の損傷や、空間的コヒーレンスの増加に伴うspeckleの発生等の問題を考慮して成されたものである。

【0032】本発明の目的は、露光機の光源として十分な出力と低コヒーレンスとを備えた紫外光を、長時間安定して発生することができ、かつ、小型でメンテナンスが容易な紫外レーザー光源を提供することにある。

【0033】

【課題を解決するための手段】上記目的は、赤外から可視までの波長範囲内の光を発生するレーザー光発生部と、前記発生した光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換光学系とを有するレーザー要素を複数並列に束ねて構成したことを特徴とする紫外レーザー光源により達成される。

【0034】より具体的には、各レーザー要素のレーザー発生部に、例えば半導体レーザー、あるいは、半導体レーザーと当該半導体レーザーにより発生された光によ

り励起される固体レーザーとを備えるものとする。

【0035】

【作用】本発明においては、各レーザー要素において、例えば半導体レーザーを備えたレーザー光発生部からの赤外光あるいは可視光を、波長変換光学系に設けられた非線形光学結晶により波長変換し、紫外光を発生させる。

【0036】このような構成のレーザー要素を複数本束ねることによって、光出力を足し合わせて、最終的に光源装置全体からの出力を高出力にする事ができる。さらに、互いに独立したレーザー要素から光を出力することで、時間的及び空間的なコヒーレンスを減少させることができる。

【0037】さらに、レーザー要素を複数本束ねて目標とする光出力を得ているため、各レーザー要素からの出力を目標とする光出力よりも小さくすることができる。このため、波長変換部の非線形光学結晶への負担を低減することができ、その劣化を最低限に抑えることができる。よって、長時間安定に動作させることができると共に、装置の寿命を長くすることができる。

【0038】

【実施例】本発明を適用した紫外レーザー光源の一実施例を図1を参照して説明する。

【0039】本実施例の紫外レーザー光源は、図1に示すように、10本 $\times$ 10本で計100本のレーザー要素から構成されている。各レーザー要素は、可視光あるいは赤外光の長波長光を発生するレーザー光発生部100と、発生したレーザー光を紫外光へ変換する波長変換部14とを有する。本実施例では、レーザー光発生部100として、半導体レーザー励起の固体レーザーを用いた例を説明する。

【0040】レーザー光発生部100は、半導体レーザー11、光ファイバー12、及び、固体レーザー13を有する。また、波長変換部14は、波長を変換する非線形結晶を含んで構成される。なお、レーザー要素には、その他にも、光学要素として、反射鏡、レンズ、波長板、偏光子などが含まれるが、その詳細構成に関しては、以下の実施例で説明するものとし、ここでの説明は省略する。

【0041】半導体レーザー11を除く、各レーザー要素の断面の寸法は、5mm $\times$ 5mm程度である。なお、本実施例では、レーザー要素を100本組み合わせた構成を例としているが、レーザー要素の数はこれに限定されるものではなく、本発明では、2本から1000本程度までを想定している。

【0042】半導体レーザー11は、固体レーザー13を励起するために用いられる。半導体レーザー11からの光によって励起された固体レーザー13は、可視光または近赤外光を発振する。本実施例では、それを波長変換部14の非線形結晶によって短波長の紫外光に変換す

る。

【0043】波長を変換する非線形結晶を固体レーザーの共振器構造中に挿入し、固体レーザー13と波長変換部14とを一体化する方式（内部共振器法）もある。この構成を使用した紫外レーザー光源については、後述する実施例で詳細に説明する。

【0044】本実施例によれば、上記構成のレーザー要素を複数本束ねることによって、光出力を足し合わせて高出力にする事ができると共に、互いに独立したレーザー要素から光を出力することで、時間的及び空間的なコヒーレンスを減少させることができる。

【0045】さらに、レーザ要素を複数本束ねることで、各レーザ要素からの出力を大きくする必要がないため、波長変換部14の非線形結晶への負担を低減することで、その劣化を最低限に抑えることができ、よって、装置の寿命を長くすることができる。

【0046】本実施例の構成のレーザー要素の発生する波長の線幅は、1 pmよりは十分小さくすることができ、レーザー要素間相互の波長の差も、固体レーザー媒質や、レーザー共振器長、波長選択用光学系の構成を調整することにより、1 pm以下に合わせることができる。

【0047】次に、半導体レーザー11について、より詳細に説明する。

【0048】半導体レーザーは、半導体内部での電子の遷移によって発光する。この電子は、外部から注入される電流によって励起される。発光する波長は、現在のところ、600 nmから1500 nm（1.5  $\mu$ m）の範囲であり、800 nm付近を発光するものには、単体で10 Wクラスの光出力を得られるものが知られている。

【0049】ただし、このような高光出力の半導体レーザーから出力される光は、横モードの性質が悪く、ビームの強度分布が単一ではない。このため、非線形結晶による波長変換をしても効率が低い。

【0050】一方、上記のような高光出力の半導体レーザーは、通常、固体レーザーを励起するには十分な集光性がある。また、投入した電力に対しての光出力が大きく、コンパクトで、流入する電流により発振出力や発振波長の微調整が可能であるという、他のレーザー光源にはない利点がある。このため、半導体レーザーは光源のコンパクトさを実現するために最適である。

【0051】半導体レーザーは、通常、数 cm 立方の箱形の装置で、10 W程度の光出力が可能であり、しかも光ファイバーにて光を取り出すことができる。

【0052】本実施例の半導体レーザー11としては、例えば、上記のような高光出力の半導体レーザーを用いる。

【0053】また、上記のような高出力の半導体レーザーと異なり、横モードの単一な半導体レーザーも知られているが、一般的に出力が小さい。現在のところ最高で

約200 mWである。しかし、次第に高出力のものも開発されてきている。このため、このような横モードの単一な半導体レーザを、本実施例の半導体レーザー11として利用する構成としても良い。

【0054】この単一横モード半導体レーザーを本実施例の半導体レーザー11として用いる場合には、半導体レーザー11から出力される光を、直接に非線形結晶で波長変換して紫外光を得ることもできる。その場合も、本実施例の特徴である複数本のレーザーの並列使用により、非線形結晶の光損傷の低減、時間的及び空間的コヒーレンスの低減という効果を、本実施例の場合と同様に、達成することができる。

【0055】次に、固体レーザー13について、より詳細に説明する。

【0056】固体レーザーとは、固体のレーザー媒質を持つレーザーの総称である。半導体レーザーも固体レーザーのひとつであるが、通常は、固体レーザーというと光によって励起される固体レーザーのことをさす。ここでもそのように区別する。

【0057】本実施例においては、励起光は半導体レーザー11より得られる。固体レーザー13は、固体のレーザー媒質と、反射鏡などの光学部品とにより構成される。また、後述する実施例で説明するように、波長変換のための非線形結晶を内蔵する構成としても良い。

【0058】固体レーザー13としては、例えば、NdをドープしたYttrium Aluminum Garnet（Nd:YAG）をレーザー媒質とするレーザーで、1064 nmの光を発生するものを用いる。このとき、励起源の半導体レーザー11としては、808 nm付近の波長を発生するものを用いる。

【0059】また、現在開発されている500 nm付近の青緑色光を発する高出力の半導体レーザーを用いることができれば、固体レーザーとして、Tiをドープしたサファイア（Ti:Sapphire）を用いることができる。固体レーザーの発生する光は横モードの分布も良く（横モードが単一である）、非線形結晶によって、より短波長への波長変換を効率良く実行することが可能である。

【0060】次に、波長変換部14に含まれる非線形光学結晶について、その波長変換作用も含めて、その構成をより詳細に説明する。

【0061】非線形光学結晶と呼ばれる、2次の非線形感受率を持った結晶、例えば $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>（BBO）や、LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>（LBO）は、周波数 $\omega_1$ （波長 $\lambda_1$ ）の光を、 $2\omega_1$ の光（波長 $\lambda_2=\lambda_1/2$ ）に変換（第2高調波発生）したり、周波数 $\omega_1$ と周波数 $\omega_2$ の光から、周波数 $\omega_3=\omega_1+\omega_2$ の光（波長 $\lambda_3$ は、 $1/\lambda_3=1/\lambda_1+1/\lambda_2$ ）を発生（和周波発生）させることができる性質を持っている。

【0062】これらの非線形光学結晶での波長変換は、

変換される波長の短波長側への限界がある。限界を決めるひとつの要因は、非線形光学結晶の透過率の限界であり、もう一つの要因は、結晶の複屈折によって変換前後の２種類の光の位相速度を合わせる位相整合の限界である。

【0063】ＢＢＯは透過率の点から、１９０nm付近が限界とされる。ＬＢＯは、透過率では１５５nm付近まで透明であるが、第２高調波発生では紫外光の発生はできず、異なる波長の和周波発生を使うと１８７nm付近まで可能である。

【0064】また、非線形光学結晶としては、 $\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$  (KBBF) や、 $\text{Sr}_2\text{Be}_2\text{B}_2\text{O}_7$  (SBB O) を用いることも可能である。これらを用いることで、より短波長の紫外光を発生することができる可能性がある。

【0065】非線形光学効果による波長変換の変換効率は、基になる基本波の強度（単位断面積あたりのパワー）に比例する。すなわち、強い光ほど効率よく変換される性質も持っている。この性質を利用するため、本実施例では、例えば、以下のような３つの方法のうち、い

ずれかまたはそれらの組み合わせを用いるものとする。

【0066】１．非線形光学結晶へ入射するレーザービームを、集光レンズや反射鏡によって細くしぼり込む。なお、これを行うためには、基になる固体レーザーの横モードが、単一モードであることが必要である。

【0067】２．共振器中に非線形結晶をいれ、共振器内での光の多重反射による光強度の増強を用いて波長変換の高効率を図る。この方法の具体例としては、固体レーザーの共振器中に非線形結晶を入れる内部共振器（intra-cavity）法と呼ばれるものと、固体レ

ザーの共振器の外に、もう一つの共振器を設けてその中に非線形結晶を入れる外部共振器（external resonant cavity）法とがある。

【0068】３．レーザー発振をパルス化し、エネルギーを短時間に集中させることによって、瞬間的な光強度を増す。この方法では、非線形結晶は共振器の中に置かず、非線形結晶を単独で配置し、それに光を一方向へ通すだけでよい。

【0069】なお、上記各方法に対応する構成については、後述する実施例でより詳細に説明する。

【0070】また、本実施例の構成に当たって注意しなければならない点として、非線形結晶の光損傷がある。すなわち、非線形結晶は、強すぎる光強度によって損傷して変換効率が落ちるといった問題がある。一方、非線形結晶において変換効率を上げるためには光の強度を上げねばならないというので、これが装置の設計においてのジレンマとなる。

【0071】現在知られているところでは、ある一定の光強度までは、光損傷はほとんど起こらない。実際の紫外発生レーザーの例でいうと、ＢＢＯによる連続光の紫

外光（２６６nm）の発生において、紫外光の出力が１００mWでは損傷は小さいが、１Wを超えると損傷が著しくなる。

【0072】本実施例においては、紫外レーザー光源全体では数ワットの光出力を発生するが、数個から数１００個の複数のレーザー要素が光出力を分担し、レーザー要素一個当たりの出力を低出力に抑える構成としている。この構成により、本実施例に含まれる複数の非線形結晶では、光損傷が起きにくく、長期間の安定した動作が可能となる。

【0073】また、本実施例においては、露光機への適用を考慮して、各レーザー要素は、個々の発振波長の線幅が１pm以下であること、及び、複数のレーザー要素相互の波長の差が１pm以下であることの二つの条件が求められている。

【0074】本実施例では、例えば、次のようにして上記２つの条件を満たすように波長を制御する。

【0075】各レーザー要素は、いくつかの縦モード（発振波長に対応する）の中から、一個の縦モードのみで発振するように調整される。そのためには共振器長を調整し、必要のあるときは波長選択性のある光学素子を挿入する。

【0076】１つの縦モードの発振線幅は、典型的には０．０１pm以下である。そこで、ひとつの縦モードでの発振（Single frequency operation）をさせることにより、個々のレーザー要素の発振線幅は、要求の１pm以下となる。

【0077】また、縦モードの固有波長は周期的に存在し、その波長間隔 $\Delta\lambda$ は、レーザー共振器の１往復の長さを２Ｌ、共振器内部の物質の屈折率をｎ、発振する波長を $\lambda$ とすると、以下の式で与えられる。

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / (2L \cdot n)$$

本実施例の典型的な例の場合として、 $L=10\text{cm}$ 、 $Nd:YAG$ の基本波の１０６４nmを用い、 $n$ として $Nd:YAG$ や非線形結晶の平均として１．７を用いると、 $\Delta\lambda$ として、２．９pmを得るが、これの５倍波の２１３nmでは、 $\Delta\lambda=0.6\text{pm}$ となる。

【0079】通常１つの縦モードを発振させると、レーザー媒質の増幅率の最も大きな波長の縦モードが発振する。この波長は、レーザー媒質により決定されるもので、複数のレーザー要素の発振している波長はレーザー媒質に固有な波長付近に揃うことになる。さらに詳しく言うと、固体レーザー媒質のもっとも増幅率の大きな波長を中心として、個々のレーザー要素では、最大で縦モード間隔の１／２（上記の例では $\pm 0.6\text{pm}/2 = \pm 0.3\text{pm}$ ）しか、互いに離れていないことになる。

【0080】共振器長 $L$ がここで述べた場合よりも小さいときには、モード間隔 $\Delta\lambda$ が離れてしまうので、各レーザー要素の共振器長 $L$ または波長選択素子の特性を調整することによって、発振波長をそろえることができ

る。

【0081】また、本実施例では、複数のレーザー要素から光が発生するので、もともと空間的コヒーレンスは低い。さらに、従来のレーザーのように、元々一本であったビームを複数に分割したものに比べてもコヒーレンスは低い。それは、複数のレーザー要素は上述したように非常に近い波長（波長の差は1  $\mu\text{m}$ 以下）を発生するが、それは周波数の違いにして通常1 GHz程度になるからである。

【0082】各レーザーの発振周波数は、なんら手を施さなくても自然に数百MHzから1 GHz程度以上離れる。ちなみに波長200 nm付近では、 $\pm 0.3 \mu\text{m}$ の波長の違いは、周波数の差にして、 $\pm 2.2 \text{ GHz}$ になる。

【0083】これは、複数のレーザーから発した光による干渉縞が、1 GHz程度の周波数で明滅することを意味している。半導体ウェハの露光の時間スケールで見ると、各レーザー要素間で作られた干渉縞は平均化されてなくなる。これは事実上各レーザーからでた光は干渉しないことを意味している。

【0084】本実施例によれば、このように空間的コヒーレンスを低下させているので従来の一本ビームの固体レーザーの時よりもスペックル低減に有利である。

【0085】本発明を適用した他の実施例について、図2及び図3を用いて説明する。ここで、図2は本実施例の紫外レーザー光源の全体図、図3は各レーザー要素の構成図である。

【0086】本実施例の紫外レーザー光源は、図2に示すように、縦10本、横10本の計100本のレーザー要素からなる。各レーザー要素は、励起光を発生する半導体レーザー21と、前記励起光を伝える光ファイバー22と、非線形結晶を含む内部共振器型の固体レーザー23とを有する。

【0087】固体レーザー23は、213 nmの連続光の紫外光を右方向に発生するものであり、図3に示すように、共振器中に、レーザー媒質であるNd:YAG 34と、波長を変換する4個の非線形結晶35、36、37、39と、反射鏡33、40と、波長板38とを有する。

【0088】本実施例において、レーザー要素一本あたりの紫外光出力は100 mW (0.1 W)程度が見込まれ、そのとき本実施例の光源全体では10 W程度の出力になる。また、各レーザー要素の固体レーザー23は、断面寸法が約3 mm角であり、全100本の束で、およそ50 mm角の光源となる。各レーザー要素は、図示されていない冷却機構により冷却される。冷却機構としては、例えば、各レーザー要素を銅でできたブロックに埋め込み、この銅ブロックを冷却装置により冷却する機構を用いることができる。

【0089】光ファイバー22は柔軟であり、長さも数

cmから数mくらい可能であるので、配置方法の変更が自由に行える。とくに、半導体レーザー21の大きさが、数cm立法である（図2では縮小して描いている）のに対して、固体レーザー23の断面寸法が数mm角であるので、光ファイバー22の柔軟性を生かして配置を行う。

【0090】本実施例の固体レーザー23は、入力された光の5倍波を発生するもので、例えば、従来報告されている4倍波発生用のレーザーから発生された4倍波を、さらに変換し、5倍波を発生させたものである。

【0091】半導体レーザー21としては、発振波長が808 nm、光ファイバー22の出口における出力が10 W程度のものを使う。半導体レーザー31からの励起光（波長808 nm）は、光ファイバー32を通して、固体レーザー23のレーザー共振器（33から40）に導かれ、反射鏡33を通してレーザー媒質であるNd:YAGロッド34を励起する。

【0092】Nd:YAGロッド34の断面寸法は、3 mm角程度以下（円断面でも良い）にし、長さは10 mm程度にする。反射鏡33は、波長808 nmの励起光に対しては高透過率とし、波長1064 nmの固体レーザーの基本波に対しては高反射率となるようにする。反射鏡33は個別の部品とせず、Nd:YAGロッド34の左端面に反射膜を付着させて代用しても良い。

【0093】レーザー媒質34から発した波長1064 nmの基本波（周波数 $\omega$ ）は、非線形結晶35、36、37、波長板38、及び、非線形結晶39を透過し、反射鏡33と、もう一方の反射鏡40の間に構成されるレーザー共振器中を往復する。各非線形結晶の断面寸法は、3 mm角程度、長さは10 mm程度にする。

【0094】このレーザー共振器中を基本波の光が往復する際、各非線形結晶などの端面での反射や散乱、内部での吸収、高調波へのエネルギーの変換などで、基本波はエネルギーを失うが、レーザー媒質のNd:YAGロッド34を通過する際に強度の増幅を受ける。その結果、共振器中の基本波の強度は増して、およそ数十ワットから数百ワットに達する。

【0095】基本波が左から右へ非線形結晶35を通る際に、波長532 nm（周波数 $2\omega$ ）の2倍波が発生（第2高調波発生、 $\omega + \omega = 2\omega$ ）する。非線形結晶35としては、LBOを用いる。基本波は、そのエネルギーの一部を変換により多少失うが、その絶対的な強度は依然として高く、高強度を保つことができる。ここでは、いわゆる、タイプIの位相整合が成り立つように、LBO端面のカット方向を決める。タイプI位相整合では、垂直方向の偏光方向を持っていた基本波から、水平方向の偏光を持った2倍波が発生する。

【0096】発生した2倍波は、基本波と共に右方向へ進み、次の非線形結晶（LBO）36に進む。そこで、2倍波と基本波の和周波発生（ $\omega + 2\omega = 3\omega$ ）が行わ

10

20

30

40

50



れ、3倍波（波長355nm）が発生する。その際に2倍波、基本波とも強度は多少低下するが、基本波は依然として高強度を保つ。ここでは、いわゆるタイプI Iの位相整合が行われるように、LBO端面をカットしておく。タイプI I位相整合では垂直方向の基本波と、水平方向の2倍波から、垂直方向成分を持った3倍波が発生する。なお、水平方向成分もあるが、ここでは無関係である。

【0097】さらに、次の非線形結晶（LBO）37によって、 $\omega + 3\omega = 4\omega$ の和周波発生が行われ、4倍波の266nmが発生する。ここでは、タイプIの位相整合が行われ、4倍波は水平方向の偏光方向を持つ。

【0098】次に、波長板38によって、基本波の偏光方向（垂直）は変えずに、4倍波の偏光方向が垂直にされる。垂直偏光の4倍波は非線形結晶（BBO）39へ入射する。

【0099】非線形結晶39では、タイプI Iの位相整合により、 $\omega + 4\omega = 5\omega$ の和周波発生が行われ、5倍波（波長213nm）を発生させる。BBO39を出たところでも、依然として基本波は高強度である。また、発生した5倍波は、およそ100mWの出力が見込まれる。

【0100】固体レーザー23（レーザー共振器）の右端では、波長選択性のある反射鏡40により、基本波を反射させて上記レーザー共振器中に折り返させる一方、発生した5倍波は透過させる。なお、2倍波から4倍波までの高調波は強度が弱まっているので、透過させても反射させても良い。反射鏡40のよって反射された基本波は、上記共振器中を逆に戻り、再びNd:YAGロッド34のよって増幅される。

【0101】本実施例では、上記レーザー共振器中の光学部品の、Nd:YAGロッド34、非線形結晶35、36、37、39等には、その端面に反射防止膜を施す。また、反射防止膜を用いずに各光学部品を密着（接着またはオプティカルコンタクト）させて反射を防止させても良い。また、反射鏡33と同様に、反射鏡40も個別部品とせず、非線形結晶39の端面に反射膜を付着させて反射面とすることで、反射鏡40を代用する構成としても良い。

【0102】また、本実施例では、5倍波以外の高調波と基本波も、低強度ながらも反射鏡40を通して出力される。もし、これらが露光に悪影響をおよぼす場合には、レーザーの外部にフィルターを設け、それによって除外する。

【0103】また、本実施例でのレーザー要素が単一の縦モードで発振しない場合には、さらに波長選択素子を加える構成としても良い。

【0104】本実施例によれば、波長213nmの紫外光で、全出力が約10W、スペクトル線幅が1pm以下で、非線形結晶の損傷が少なく、空間的コヒーレンスの

低い紫外レーザー光源が実現される。

【0105】本発明を適用した他の実施例について、図4を用いて説明する。ここで、図4は本実施例における各レーザー要素の構成、及び、その内部でのレーザービームの伝搬経路を示した図である。

【0106】本実施例の紫外レーザー光源は、上記図2、3の実施例と同様に、複数のレーザー要素を並列に束にして構成したものであり、図4に示すような光学的な構造を有する。すなわち、本実施例の各レーザー要素は、長波長のレーザーを発生する小型レーザー41と、波長変換を行う非線形結晶43、45と、小型レーザー41と非線形結晶43との間、非線形結晶43と非線形結晶45との間、非線形結晶45の射出側にそれぞれ設けられた、レンズ42、44、46とを有する。

【0107】本実施例では、小型レーザー41としては、波長820nmを発する出力150mW程度の単一横モードの半導体レーザー41を用いるもので、使用される波長変換の方法は外部共振器法である。

【0108】外部共振器法としては、例えば「Generation of 41 mW of blue radiation by frequency doubling of a GaAlAs diode laser (W. J. Kozlovsky, W. Lenth, E. E. Latta, A. Moser and G. L. Bona, Applied Physics Letters, Vol. 56, p. 2291, (1990))」に記載の例のように、856nmを428nmに波長変換させるものがある。本実施例のレーザー要素は、このような外部共振器法を利用して、820nmから410nmへ、さらに410nmから205nmへの2段変換としたものである。

【0109】本実施例において、半導体レーザー41から出た波長820nmの光は、レンズ42で方向と収束角を整えて、非線形結晶43に入射される。ここで、非線形結晶43としては、LBOを用いる。

【0110】非線形結晶43の左右両端面は、図4に示すように傾いた凸状の鏡面に研磨され、さらに820nmの基本波に対しては高反射率になり、波長410nmの2倍波に対しては高透過率になるような波長選択性の反射膜が形成されている。非線形結晶43の断面は、5mm角程度、長さは15mm程度である。

【0111】非線形結晶43の内部はリング共振器構造を形成している。すなわち、左右両端面と、平面に研磨された下面の全反射を用いて三角形に光を閉じこめる構造（リング共振器）になっている。このように、一体の結晶からなる共振器をモノリシック共振器という。

【0112】非線形結晶43に入射した820nmの基本波は、その共振器構造中でその強度が強められ、最もビームのしぼり込まれた水平方向のビーム位置で第2高調波発生が強く起こり、2倍波の410nmの光が水平

方向（右方向）に発生する。

【0113】発生した2倍波は、そのほとんどが非線形結晶43の右端から出射し、レンズ44を経て角度と収束角を整えて、次の非線形結晶45に入射する。一方、800nmの基本波は、そのほとんどが非線形結晶43の中に閉じこめられ、その右端面から出射するものの強度は低い。

【0114】非線形結晶45としては、BBOを用いる。また、非線形結晶45の左右両端には、410nmの2倍波には高反射率で、205nmの4倍波には高透過率の波長選択性の反射膜を形成する。非線形結晶45も、非線形結晶43と同じ構成を有するモノリシック共振器であり、第2高調波発生によって、410nmの2倍波から205nmの4倍波を発生し、発生した4倍波をその右端面から出射する。非線形結晶45の寸法も、非線形結晶43と同程度とする。

【0115】発生された4倍波は、レンズ46へ入射し方向と発散角が整えられて、紫外レーザー出力として出力される。最終的な205nmの紫外光の出力としては、一個のレーザー要素あたり、50mW程度が見込まれる。

【0116】また、ふたつの非線形結晶モノリシックキャビティの共振波長と、半導体レーザーの発振波長を合わせるための構成として、例えば「Longitudinally diode-pumped continuous-wave 3.5-W green laser (L. Y. Liu, M. Oka, W. Wiechmann and S. Kubota, Optics Letters, Vol. 19, p. 189 (1994))」に記載されているような、周知のサーボ制御の電気回路を設けても良い。

【0117】モノリシックキャビティの共振線幅は、通常、1pmよりも十分に小さいが、さらに、複数の半導体レーザーの中から、使用しようとする発振波長のものを選択し、非線形結晶の寸法を各レーザー要素間で一致させることによって、レーザー要素間の波長の差を小さくすることができる。

【0118】波長の一致がそれでも不十分の場合には、エタロンなどの波長選択素子を挿入するか、種になる光を各半導体レーザーに入射させるインジェクションロックと呼ばれる周知の方法を用いることで、各レーザー要素間の波長を一致させる構成としても良い。

【0119】本実施例の紫外レーザー光源によれば、100本のレーザー要素の合計で5W程度の紫外光出力が見込まれる。なお、半導体レーザー41として、772nmの光を発生するものを使えば、4倍波は193nmとなり、ArFエキシマレーザーと同じ波長になる。この場合にはエキシマレーザーの代替として使用することができる。そのとき4倍波発生用の結晶としては、KB BFを用いる。

【0120】本発明を適用した紫外レーザー光源の他の実施例を図5を用いて説明する。

【0121】本実施例の紫外レーザー光源は、上記図2の実施例と同様に、複数のレーザー要素を並列に束にして構成したものであり、各レーザー要素は、図5に示すような光学的な構造を有する。

【0122】すなわち、各レーザー要素は、励起光を発生する半導体レーザー51と、励起光により励起され基本波の光を発生すると共に、当該基本波を2倍波へ変換するレーザー共振器（固体レーザー）501と、当該2倍波を4倍波に変換する外部共振器構造を有する波長変換部502と、レーザー共振器501と波長変換部502との間に設けられた集光用レンズ57とを有し、最終的に266nmの紫外光を出力する。

【0123】レーザー共振器501は、レンズ52と、反射鏡53、56と、固体レーザー媒質のNd:YAGロッド54と、波長変換を行う非線形結晶55とを有する。また、波長変換部502は、波長変換を行う非線形結晶59と、当該非線形結晶59の両側に配置された反射鏡58、60とを有する。

【0124】半導体レーザー51からの波長808nmの励起光（出力3W）は、レンズ52で集光され、反射鏡53を通して、Nd:YAGロッド54に入射する。ここで、図3の実施例と同様に光ファイバーを用いて半導体レーザーからの光を、反射鏡まで導入する構成としても良い。

【0125】反射鏡53は、波長808nmの励起光に対しては高透過率、波長1064nmの光には高反射率、波長532nmの光に対しては高透過率の反射膜を形成する。Nd:YAGロッド54は、半導体レーザー51からの励起光が入射され、1064nmの基本波を発生するもので、その断面寸法は、3mm角程度、長さは10mm程度である。

【0126】発生された基本波は、非線形結晶55へ入射し、そこで2倍波へ変換される。非線形結晶55は、2倍波発生用の非線形結晶KTiOPO<sub>4</sub>（KTP）55を含んで構成されるもので、Nd:YAGロッド54とほぼ同じ寸法を持つ。

【0127】反射鏡56には、波長1064nmの基本波に対しては高反射率、532nmの2倍波に対しては、高透過率の反射膜が施されている。レーザー共振器501には、上記構成に加え、さらに、縦モードを単一にするための、波長板や偏光素子（どちらも図不示）を含むものとする。

【0128】本実施例では、レーザー共振器501中には、高強度の1064nmの基本波が閉じこめられ、非線形結晶55によって、532nmの2倍波の光が発生して、この2倍波が反射鏡56から出射される。

【0129】ここで、本実施例の反射鏡53を、レーザー媒質54の左端面に反射膜を形成することで代用する

構成としても良い。同様に、反射鏡 56 を非線形結晶 55 の右端を反射面とすることで代用する構成としても良い。

【0130】レーザ共振器 501 を出射した 2 倍波の 532 nm 光は、レンズ 57 で収束角を整えられて、非線形結晶 59 を含んで共振器構造を形成する波長変換部 502（以下では外部共振器と呼ぶ）へ入射する。非線形結晶 59 としては BBO を用いる。外部共振器 502 へ入射した 532 nm の 2 倍波光は、266 nm の 4 倍波光に変換される。

【0131】なお、外部共振器 502 の共振波長が、レーザ共振器 501 から発生する光の波長に同調するように、周知の電氣的なサーボ回路を設ける構成としても良い。また、本実施例の反射鏡 58、60 の代わりに、非線形結晶 59 の両端面を加工、反射膜を形成し、反射鏡 58、60 を省略する構成としても良い。

【0132】本実施例によれば、半導体レーザ 51 として 3 W 程度の出力のものをを用いたとき、各レーザ要素からの最終的に出力される 266 nm の紫外光の光出力として、100 mW 程度が見込まれる。

【0133】本発明を適用した紫外レーザ光源の他の実施例を、図 6 を用いて説明する。本実施例は、上記図 3～図 5 の実施例で用いられた連続光の代わりに、パルス光を用いるものである。

【0134】本実施例の紫外レーザ光源も、図 2 の実施例と同様に、複数本のレーザ要素を並列にして構成されるものであり、各レーザ要素は、図 6 に示すような光学的構造を有している。

【0135】すなわち、本実施例の各レーザ要素は、周知の Q スイッチ法によるパルスレーザと、2 倍波への変換用の非線形結晶 67 と、4 倍波への変換用の非線形結晶 68 とを有する。

【0136】パルスレーザは、半導体レーザ 61 と、光ファイバー 62 と、固体レーザ（レーザ共振器）601 とから構成される。レーザ共振器 601 は、レーザ媒質 64 及び変調器 65 と、その両側に配置される反射鏡 63、66 とを有する。

【0137】半導体レーザ 61 からの励起光は、光ファイバー 62 を通してレーザ共振器 601 に導かれ、反射鏡 63 を通り、レーザ媒質である Nd:YLF 結晶 64 を励起する。なお、光ファイバー 62 を用いずに、図 5 の実施例で行われたようにレンズで集光して、レーザ共振器 601 まで導く構成としても良い。

【0138】レーザ共振器 601 には、音響光学効果による変調器 64 が内蔵されており、いわゆる Q スイッチ法により、波長 1064 nm のパルス光を発生する。この発生されたパルス光のパルス幅は約 10 ns、1 パルスのエネルギーは約 100  $\mu$  J、パルスの繰り返し周波数は、約 10 kHz である。この構成によれば、平均エネルギー出力は約 1 W となる。

【0139】レーザ共振器 601 から出力されたパルス光は、ピーク出力が大きいので、波長変換の際に共振器構造を利用しなくても、効率の高い波長変換が行われる。

【0140】本実施例では、レーザ共振器 601 から出射された 1064 nm の基本波を、最初の非線形結晶 (KTP) 67 で 532 nm の 2 倍波にし、2 個目の非線形結晶 (BBO) 68 で 4 倍波の 266 nm の紫外光を発生する。さらに、BBO 結晶によって、基本波と 4 倍波の和周波発生を行い、213 nm の紫外光の発生も可能である。

【0141】ここで、波長の変換効率をさらに上げるために、集光レンズを設け、レーザ光を集光した後に非線形結晶に光を通す構成としても良い。

【0142】本実施例のレーザ要素の構成によれば、最終的に得られる 266 nm の紫外光出力（平均出力）としては、100 mW 程度が見込まれる。よって、上記レーザ要素を 10×10 の計 100 本を束にした、紫外レーザ光源全体としては、10 W 程度の合計出力が見込まれる。

【0143】本実施例によれば、コンパクト性、空間的コヒーレンスの低さ、メンテナンスの容易性などの利点を達成することができ、かつ、パルス光を発生することができる、紫外レーザ光源を実現することができる。

【0144】なお、本実施例はパルス光を用いているため、このままではスペクトル線幅がひろく、出力される紫外光の線幅にして、100 pm 程度になる。このため、露光機で使用する場合には、色消し設計のされた露光機で用いる。

【0145】しかし、インジェクションロックと呼ばれる公知の方法により、スペクトル線幅を 1 pm 以下にすることも可能である。

【0146】

【効果】本発明によれば、コンパクトでメンテナンスが容易で、電力利用効率が高く、光出力の制御が容易で、しかも非線形結晶の損傷が小さくて、空間的コヒーレンスの低い紫外光を発生する紫外レーザ光源を提供することができる。

【0147】

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明による紫外レーザ光源の一実施例の全体構成を示す斜視図である。

【図 2】本発明の他の実施例の全体構成を示す斜視図である。

【図 3】図 2 の実施例のレーザ要素の光学的構造の一例を示す説明図である。

【図 4】本発明の他の実施例のレーザ要素の光学的構造の一例を示す説明図である。

【図 5】本発明の他の実施例のレーザ要素の光学的構造の一例を示す説明図である。

【図 6】本発明の他の実施例のレーザー要素の光学的構造の一例を示す説明図である。

【符号の説明】

1 1…半導体レーザー、1 2…光ファイバー、1 3…固体レーザー、1 4…波長変換部、2 1…半導体レーザー \*

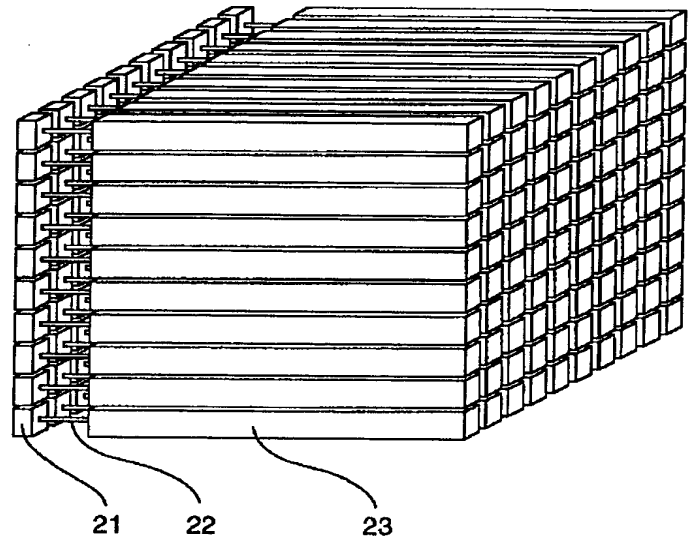
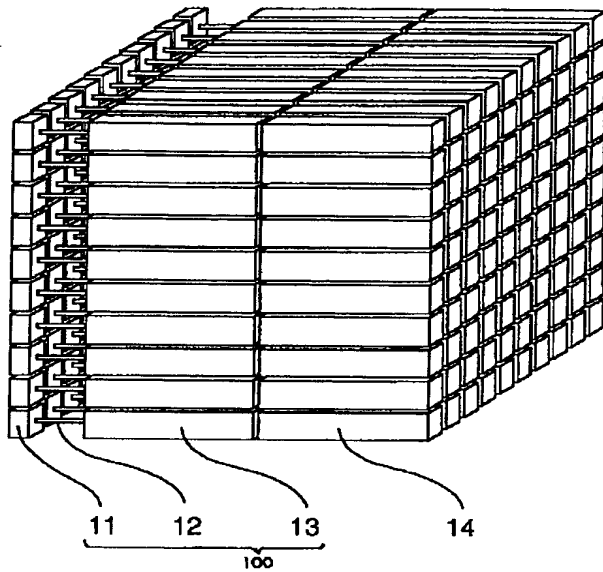
\* 一、2 2…光ファイバー、2 3…固体レーザー、3 3…反射鏡、3 4…レーザー媒質、3 5、3 6、3 7…非線形結晶、3 8…波長板、3 9…非線形結晶、4 0…反射鏡、1 0 0…レーザー光発生部。

【図 1】

【図 2】

図 1

図 2

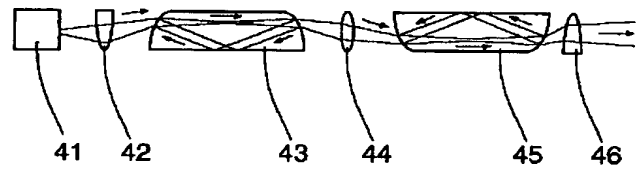
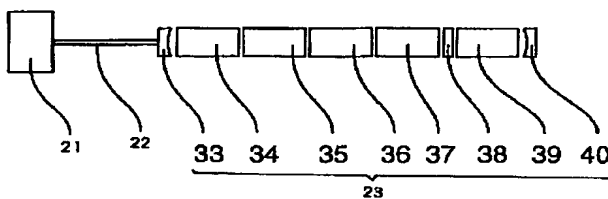


【図 4】

【図 3】

図 4

図 3



【図 5】

【図 6】

図 5

図 6

